

非塑性細粒土を含む砂における液状化特性に関する研究
その 3 繰返し再載荷の影響

Study on Liquefaction Characteristics of Sandy Soils Having Non-Plastic Fines
Part 3 Effect of Cyclic Reloading on Liquefaction Resistance

○板垣俊一³, 山田雅一¹, 安達俊夫¹, 宮澤翔², 道明裕毅²

*Shunichi Itagaki³, Masaichi Yamada¹, Toshio Adachi¹, Sho Miyazawa², Yuki Domyo²

Abstract: The objective of this study is related to effect of non-plastic fines on the liquefaction characteristics of sandy soils. In this paper, the effect of the liquefaction characteristics in cyclic reloading are investigated by using hollow cylindrical torsional shear tests results on sandy soils having varying fines contents.

1.はじめに

2011 年の東北地方太平洋沖地震では、1987 年の千葉県東方沖地震により液状化した地域の一部において、再液状化現象が発生した¹⁾。さらに本震後の余震により、東京湾東部沿岸の非塑性細粒土を含む海岸埋立地盤において液状化被害が拡大した¹⁾。前報その²⁾では、非塑性細粒土を含む砂に対する繰返し中空ねじりせん断試験結果を基に、簡易な液状化判定に用いられる細粒分含有率による N 値の補正方法について検討を行った。本報告では、非塑性細粒土を含む砂の再液状化現象を検討するために、中空ねじりせん断試験により、非塑性細粒土を混合した砂の同一供試体に対して二度の非排水繰返し載荷を行った。また、非塑性細粒土を含む砂に対して、繰返し再載荷が液状化抵抗に及ぼす影響と液状化による沈下量を評価するのに必要となる体積ひずみについて検討する。

2.試験概要

2.1.試料

試料は、粗粒土である豊浦砂と非塑性のシルト(DL クレイ; $\rho_s=2.659\text{g/cm}^3$)を用いた。Table 1 に豊浦砂の物理的性質を示す。また、各試料の粒径加積曲線を Fig.1 に示す。

Table 1. Physical properties of Toyoura sands

土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}
2.631	0.964	0.608

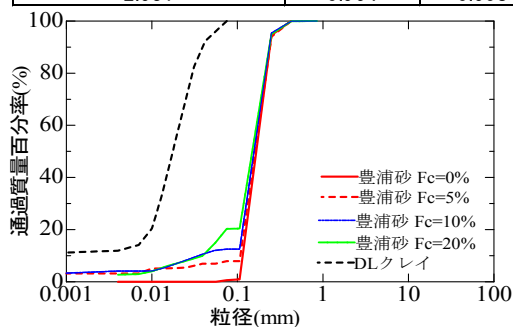


Fig.1 Grain size distribution curve

2.2.試験方法

供試体は中空円筒供試体(外径 10 cm, 内径 6 cm, 高さ 10 cm)を JGS 0550 に準拠してドライタンピング法により

作製した。豊浦砂の相対密度 D_r を 40% として、細粒分含有率は $F_c=0\%$, 5% , 10% , 20% とした。供試体は炭酸ガス、脱気水および背圧で飽和させ、B 値が 0.96 以上であることを確認した後、有効拘束圧 σ'_0 を 49kN/m^2 として等方圧密をした。荷重(トルク)は応力制御で正弦波の一定応力振幅による繰返し載荷を行った。せん断ひずみの両振幅 γ_{DA} が 15% に達した後、ひずみ値がゼロクロスした後に載荷を終了させた。一度目の載荷後に、供試体からの間隙水の排水量を差圧計で計測し、ほぼ一定値に収束するまで再圧密を行った。繰返し再載荷は一度目の載荷と同じ一定応力振幅で繰返し載荷を行った。再載荷試験後は、体積ひずみを求めるために、一度目の載荷と同様に供試体からの間隙水の排水量を差圧計で計測した。また、本報告で定義した相対密度は、粗粒土(粒径が $0.075\text{mm}\sim 2\text{mm}$)のみの骨格構造による間隙比で評価するもので、詳細は前報その²⁾を参照されたい。

3.試験結果

3.1.液状化抵抗

一度目の繰返し載荷と再載荷における液状化抵抗について検討する。本試験より得られたせん断応力比 τ/σ'_0 とせん断ひずみの両振幅 γ_{DA} が 7.5% に達した時の繰返し回数 N の関係の試験結果を Fig.2 に示す。

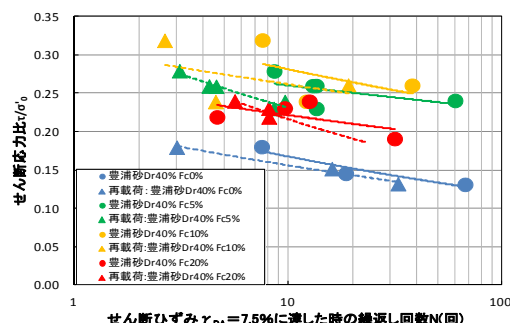


Fig.2 Relationship between shear stress ratio and number of loading cycles

同図中の各試料に対する液状化強度曲線は(1)式より求めたものである。

$$\tau/\sigma'_0 = a(N)^{-b} \quad (1)$$

ここで、 a 、 b は実験定数である。また、(1)式より得られた液状化抵抗 R_{15} を Table 2 に示す。ここで定義した R_{15} は、繰返し回数 15 回でせん断ひずみの両振幅 γ_{DA} が 7.5% に達した時のせん断応力比である。一度目の載荷時の液状化抵抗を ${}_1R_{15}$ 、再載荷時の液状化抵抗を ${}_2R_{15}$ とした。液状化抵抗比 ${}_2R_{15}/{}_1R_{15}$ は一度目の載荷時の液状化抵抗に対する再載荷時の液状化抵抗の割合を表している。同様に相対密度 D_r についても、初期圧密時の相対密度を D_{r0} として再圧密後と試験終了後の相対密度をそれぞれ D_{r1} と D_{r2} と定義する。Fig.3 には、液状化抵抗比 ${}_2R_{15}/{}_1R_{15}$ 、相対密度比 D_{r1}/D_{r0} および D_{r2}/D_{r0} と細粒分含有率 F_c との関係の試験結果をまとめて示した。Table 2 と Fig.3 より、全ての試験条件において一度目の載荷時の液状化抵抗 R_{15} に比べ、再載荷時の R_{15} 値は低下することがわかる。

Table 2. Liquefaction resistance R_{15} of first loading and second loading

細粒分含有率 (%)	両振幅ひずみ $\gamma_{DA}=7.5\%$		
	液状化強度 一度目の載荷 ${}_1R_{15}$	液状化強度 再載荷 ${}_2R_{15}$	${}_2R_{15}/{}_1R_{15}$ (%)
$F_c=0\%$	0.16	0.15	95
$F_c=5\%$	0.25	0.22	86
$F_c=10\%$	0.29	0.25	87
$F_c=20\%$	0.21	0.20	94

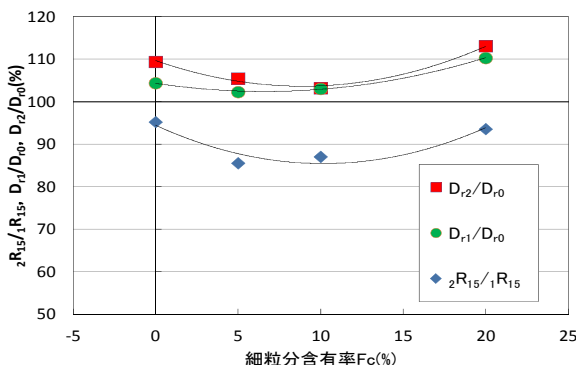


Fig 3. Relationship between ${}_2R_{15}/{}_1R_{15}$, D_{r1}/D_{r0} , D_{r2}/D_{r0} and fine content

次に相対密度 D_r と液状化抵抗 R_{15} について検討する。Fig.3 より、細粒分含有率の変化に伴う相対密度の増加傾向と液状化抵抗の減少傾向は良く対応していることが見て取れる。液状化した供試体が再圧密により相対密度が増大したにも関わらず、二度目の繰返し載荷に対して液状化抵抗が低下する現象は、細粒分を含まない砂に対して Finn ら³⁾の繰返し三軸試験により得られている。細粒分を含んだ砂に対しても、細粒分含有率によって異なるが同様の傾向が見られた。これは、非排水条件下での大ひずみせん断履歴は砂の強度を低下させる作用があることから、一度目の載荷時に大ひずみせん断履歴を受けたことにより砂の骨格構造が弱体化したものと考えられる。

3.2.体積ひずみ

液状化による沈下量を評価するため、再載荷時における体積ひずみについて検討する。文献⁴⁾では、最小間隙比 e_{min} と液状化抵抗 R_{15} を用いて、最大体積ひずみ ϵ_{vmax}

を検討した。ここで定義する e_{min} は粗粒土に対する e_{min} である。Fig.4 に ϵ_{vmax} と e_{min}/R_{15} の本試験結果をプロットした。同図中には文献⁵⁾で報告した $F_c=0\%$, 5% , 10% の豊浦砂($D_r=60\%$)と、 $F_c=0\%$ の豊浦砂($D_r=80\%$)、霞ヶ浦砂 a($D_r=60\%$, 80%)および霞ヶ浦砂 b($D_r=60\%$)の試験結果を併せ示した。また、一度目の載荷で得られた本試験結果と文献⁴⁾の試験結果に対する近似曲線と、再載荷の試験結果に対する近似曲線を実線で示した。同図より、一度目の載荷時の ϵ_{vmax} と e_{min}/R_{15} の関係は、砂の種類、相対密度、および細粒分含有率によらず比較的良い相関を示していることがわかる。一方、再載荷時の ϵ_{vmax} と e_{min}/R_{15} の関係は、一度目の載荷時の近似曲線と類似した曲線を示したことから、 e_{min}/R_{15} を用いて再載荷時の最大体積ひずみを評価できる可能性が示唆された。

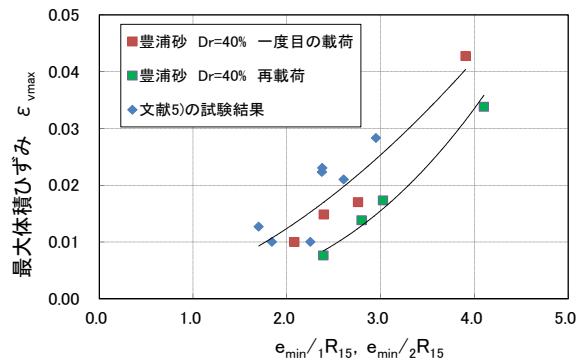


Fig 4. Relationship between ϵ_{vmax} and e_{min}/R_{15}

4.まとめ

中空ねじりせん断試験により同一供試体に対して二度の非排水繰返し載荷を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 細粒分含有率 F_c の範囲($F_c=0\sim 20\%$)において、一度目の載荷時の液状化抵抗 ${}_1R_{15}$ と比較すると再載荷時の液状化抵抗 ${}_2R_{15}$ は低下した。
- 2) 再載荷時の相対密度 D_{r1} は、初期圧密時の相対密度 D_{r0} に比べて増加したが、液状化抵抗 R_{15} は減少する傾向を示した。この減少傾向は相対密度の増加傾向と対応していることがわかった。
- 3) 再載荷後の最大体積ひずみ ϵ_{vmax} は、最小間隙比 e_{min} と液状化抵抗 ${}_2R_{15}$ から評価できる可能性を示した。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会:2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報,pp.535-536,2011.
- 2) 藤森圭祐 他:非塑性細粒土を含む砂における液状化特性に関する研究 その2,液状化判定における補正N値の検討,日本大学理工学部学術講演会論文集,167-168,2013.
- 3) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J.: Effects of Strain History on Liquefaction of Sands, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, Vol.96, No.SM6, pp.1917-1934, 1910.
- 4) 堂野前大貴 他:エネルギーの釣合に基づく液状化地盤の損傷評価に関する研究 その 4,エネルギー～最大体積ひずみ関係の検討,日本大学理工学部学術講演会論文集,2014
- 5) 山田峻作 他:中空ねじりせん断試験による砂の体積ひずみとひずみエネルギーの関係,第 49 回地盤工学研究発表会,pp461-462,2014.